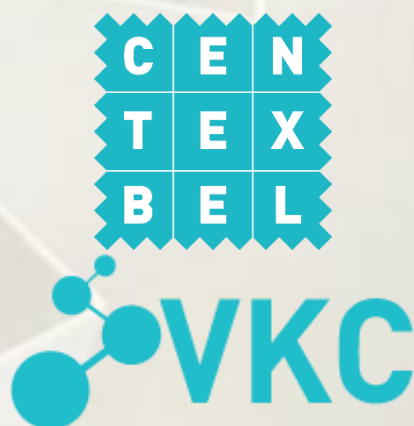




Een strategische analyse van de principes van Safe & Sustainable by Design (SSbD) en Design2Recycle in slimme textiel en composieten

Thermoharv als een kans om nieuwe industrielenormen te stellen

Auteurs : Brecht Demedts (Centexbel) & Elbeshary Mohammed

Interreg



Cofinancé par
l'Union Européenne
Medagefinancierd door
de Europese Unie

France - Wallonie - Vlaanderen



THERMOHARV

west-vlaanderen
de gedreven provincie



I. Samenvatting van de Groene Overgang katalyseren

De wereldwijde noodzaak om over te gaan naar een circulaire en klimaatneutrale economie heeft de ontwikkeling van innovatieve materialen en producten op het snijvlak van technologie en duurzaamheid gestimuleerd. Het Thermoharv-project, een Frans-Belgisch onderzoeksinitiatief, vormt een cruciale praktijkstudie voor deze overgang. De missie om slimme textiel en composieten te ontwikkelen voor afvalwarmteterugwinning in slimme gebouwen en kleding sluit direct aan bij de proactieve beleidskaders van de Europese Unie, met name het vrijwillige Safe & Sustainable by Design (SSbD)-kader.¹ Dit rapport biedt een strategische analyse van Thermoharv, waarin de toepassing van deze principes wordt beoordeeld van materiaalselectie tot herstel aan het einde van de levensduur.

De centrale uitdaging waarmee multimateriaalproducten zoals die van het Thermoharv-project worden geconfronteerd, is een fundamentele paradox: de functionele complexiteit die ze innovatief maakt, zoals de fusie van elektronica en polymeren in textiel, ondermijnt tegelijkertijd hun compatibiliteit met traditionele recyclingmethoden.³ Dit rapport stelt dat het overwinnen van deze paradox een "gekoppelde" benadering vereist, waarbij de principes van circulair ontwerp van de volgende generatie en geavanceerde recyclingtechnologieën worden geïntegreerd met nieuwe systemische businessmodellen.⁵

De analyse concludeert dat het succes van Thermoharv afhangt van het vermogen om drie belangrijke strategische paden te bewandelen: ten eerste door de producten te herontwerpen om demontage en scheiding van materialen te vergemakkelijken; ten tweede door gebruik te maken van geavanceerde recyclingtechnologieën, zoals oplosmiddelgebaseerde processen, om materiaalherwinning met hoge zuiverheid te bereiken; en ten slotte, Het verkennen van circulaire bedrijfsmodellen, zoals product-as-a-service, om gecontroleerd end-of-life management te waarborgen.⁶ Hierdoor kan het Thermoharv-project dienen als model voor een echt circulaire en veilige economie, waarbij de duurzaamheid van een regelgevende last wordt omgevormd tot een bron van concurrentievoordeel en innovatie.

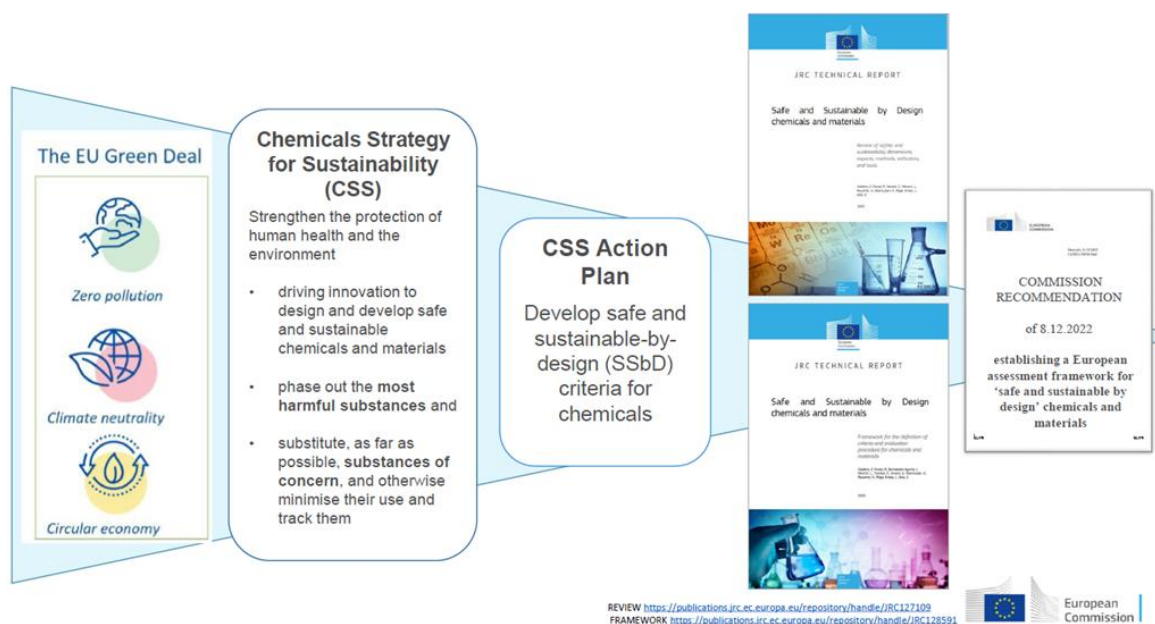
Sectietitel	Hoofdthema	Belangrijk punt
I. Samenvatting	Strategisch overzicht	Thermoharv is een cruciaal testgeval voor het Europese beleid, geconfronteerd met een paradox van materiële complexiteit.
II. Het politieke landschap	Contextueel kader	De EU beweegt zich van reactieve naar proactieve duurzaamheidsregulering om innovatie te sturen.
III. Het Thermoharv-project	Praktische toepassing	De materiële en functionele doelen van Thermoharv sluiten direct aan bij de SSbD-principes voor energie-oogst.

IV. De uitdaging van circulariteit	Kritische Analyse	Multimateriaalproducten ondervinden aanzienlijke technische barrières en een "risicocyclus" met betrekking tot gevaarlijke oude toevoegingen uit recycling.
V. Op weg naar een cirkelvormige toekomst	Beleidsaanbevelingen	Succes vereist een gekoppelde aanpak: geavanceerde recycling, circulair ontwerp en nieuwe businessmodellen.
VI. Conclusie	Samenvatting en plan	De reis van Thermoharv kan dienen als model voor een nieuw tijdperk van veilige, duurzame en economisch levensvatbare innovatie.

II. Het beleidslandschap: Een kader voor groene innovatie

2.1 Het Safe & Sustainable by Design (SSbD) raamwerk: een paradigmaverschuiving

Het Safe & Sustainable by Design (SSbD)-kader van de Europese Commissie vertegenwoordigt een fundamentele verschuiving in de aanpak van het continent ten aanzien van milieu- en chemisch beleid. SSbD, voorgesteld in december 2022 als een vrijwillig kader, is ontworpen als een proactieve, pre-commercialisatie gids voor innovatie, in plaats van een rigide post-trade reguleringsinstrument.¹ Het belangrijkste doel is om de overgang naar veiligere en duurzamere chemicaliën, materialen en producten te versnellen door duidelijke richtlijnen te bieden voor R&D, beleid en financiële ondersteuning.¹ In tegenstelling tot regelgeving zoals REACH (Registratie, Evaluatie, Autorisatie en Beperking van Chemicaliën), die vaak stoffen beperken of verbieden nadat ze breed zijn gebruikt, streeft SSbD ernaar veiligheids- en duurzaamheidsoverwegingen vanaf de vroegste stadia van de levenscyclus van een product te integreren.¹



Figuur 5. Basisprincipes voor het SSbD-framework

Deze preventieve aanpak is bedoeld om de aanzienlijke economische en technische obstakels te vermijden waarmee duurzame innovatie-pioniers historisch hebben geconfronteerd.¹ Het kader (Figuur 2) geeft expliciete nieuwe definities voor de kernprincipes: "veilig" wordt gedefinieerd als de afwezigheid van onaanvaardbaar risico voor mensen en het milieu, bij voorkeur bereikt door inherent gevaarlijke materialen te vermijden, terwijl "duurzaam" verwijst naar het vermogen van een materiaal om zijn functie te vervullen zonder milieu- en ecologische grenzen over zijn gehele levenscyclus te overschrijden, terwijl ze sociaaleconomische voordelen brachten.¹ Het iteratieve karakter van het kader, dat momenteel in de test- en herzieningsfase is met feedback uit meer dan 80 casestudy's, wijst erop dat de Commissie het bedoeld heeft als een dynamisch en praktisch instrument voor industrie en academische wereld.² Door zich aan te sluiten bij de SSbD krijgen bedrijven "regelgevende paraatheid" en "toekomstparaatheid", waardoor duurzaamheid effectief verandert van een potentiële nalevingskosten in een strategisch concurrentievoordeel.¹⁰ De fundamentele toewijding van het Thermoharv-project aan een "ecologisch verantwoordelijke benadering" van materiële keuze maakt het tot een onschatbare pilot voor dit zich ontwikkelende beleid, dat het soort praktische feedback biedt dat de verdere ontwikkeling van het kader zal beïnvloeden.¹²

2.2 De circulaire economie en design2Recycle: voorbij het lineaire model

Het concept van de circulaire economie vormt de economische en systemische basis van het SSbD-kader. Het staat in schril contrast met het traditionele lineaire "nemen-maken-ontdoen"-model, dat steunt op de continue winning van eindige hulpbronnen.¹³ De circulaire economie is een systeembenadering gebaseerd op drie fundamentele principes, allemaal ontworpen door ontwerp: ten eerste het elimineren van afval en vervuiling; ten tweede het maximaliseren van producten en materialen; en ten derde het regenereren van de natuur.¹⁴ De principes zijn gebaseerd op een overgang naar hernieuwbare energie en materialen, waarmee een veerkrachtig systeem ontstaat dat economische activiteit loskoppelt van het verbruik van eindige hulpbronnen.^{Art. 14}

In deze context is "Design2Recycle" niet alleen een eindoplossing, maar een fundamentele filosofie. Dit vereist een volledige heroverweging van het productieproces vanaf het begin, waarbij ontwerpers de macht hebben om de hele productlevenscyclus te beïnvloeden.¹³ Dit houdt in dat producten worden ontworpen voor duurzaamheid, reparatie en modulariteit, en het overwegen van het levenseinde van een product sinds het begin.¹³ Het SSbD-principe van "Design for the End of Life" legt deze benadering direct op aan innovators en onderzoekers.¹¹ De adoptie van deze filosofie wordt gemotiveerd door veel meer dan alleen milieuverantwoordelijkheid. Het biedt aanzienlijke economische voordelen, waaronder verminderde uitputting van hulpbronnen, kostenbesparing door materiaalefficiëntie, evenals het creëren van nieuwe inkomstenstromen en groene banen.¹³ Het Thermoharv-project moet van nature deze filosofie belichamen om succesvol te zijn, aangezien de complexe, meerlaagse producten anders afvalstromen zouden worden die aan het einde van hun levensduur moeilijk te recycleren zijn.⁴

2.3 De textiel- en composietstrategieën van de EU: een sectoraal mandaat

Het Thermoharv-project opereert op het kruispunt van twee prioritaire sectoren voor de groene transitie van de Europese Unie: textiel en composieten. De Europese Strategie voor Duurzame en Circulaire Textiel stelt een ambitieuze visie voor 2030, waarbij alle textielproducten op de markt duurzaam, herstelbaar, recyclebaar zijn, grotendeels uit gerecyclede vezels bestaan en vrij van gevaarlijke stoffen.¹⁷ Deze strategie wordt ondersteund door belangrijke wetgevende instrumenten zoals de Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR) en het voorstel om verplichte en geharmoniseerde regels voor uitgebreide producentenverantwoordelijkheid (EPR) voor textiel in te voeren.¹⁷ Deze beleidsmaatregelen zijn bedoeld om overproductie en overconsumptie om te keren en producenten aan te moedigen duurzamere producten te ontwerpen.^{Art. 17}

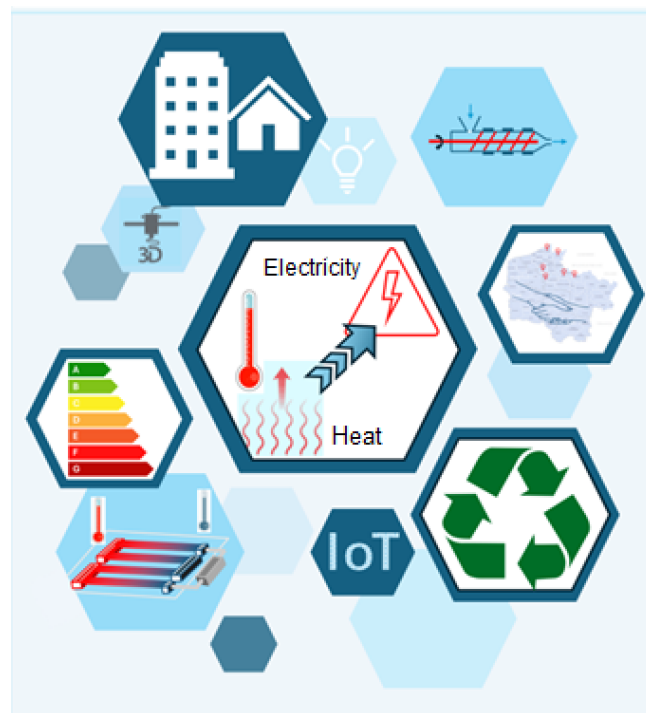
Evenzo bestaat er voor de composietenindustrie een strategische routekaart om de duurzaamheid van producten gedurende hun hele levenscyclus te versterken.¹⁹ Middellangetermijndoelstellingen (2026–2028) omvatten het implementeren van ontwerppraktijken die modulariteit, eenvoudige demontage en scheiding van materialen prioriteren.¹⁹ Dit omvat het gebruik van laagdichtheid, biologisch geproduceerde materialen die gemakkelijker te verwijderen zijn, en de mogelijkheid om elk composietproduct ontwerpelijk te demonteren.¹⁹ De dual-sectorale relevantie van Thermoharv's producten — slimme textiel en flexibele composieten — plaatst het project centraal in deze veranderende regelgeving. Het succes van het project hangt dus niet alleen af van technische prestaties, maar ook van het vermogen om proactief te reageren en deze sectorspecifieke opdrachten vorm te geven, een proces dat volledig aansluit bij het SSbD-kader.

III. Het Thermoharv-project: Een verband tussen beleid en praktijk

3.1 Projectoverzicht en doelstellingen

Het Thermoharv-project (F) is een samenwerkingsinitiatief voor onderzoek waarbij een consortium van Franse en Belgische partners betrokken is, waaronder de Universiteit van Mons (coördinator), ITM Nord Europe, Centexbel en de Universiteit van Rijsel.¹² Gefinancierd door Interreg V FWVL, loopt het project van oktober 2024 tot september 2028 en is het gewijd aan de ontwikkeling van innovatieve apparaten voor de winning van thermische energie.^{De} belangrijkste taak is het creëren van flexibele polymeermaterialen die afvalwarmte uit gebouwen kunnen terugwinnen—zoals warmte van warmwaterleidingen of door de zon blootgestelde glazen oppervlakken—en deze omzetten in bruikbare

elektrische energie.²⁰ Deze energie is bedoeld om energiezuinige elektronische apparaten en sensoren van stroom te voorzien, zoals huisautomatiseringssystemen, rookmelders of bewegingssensoren.²⁰

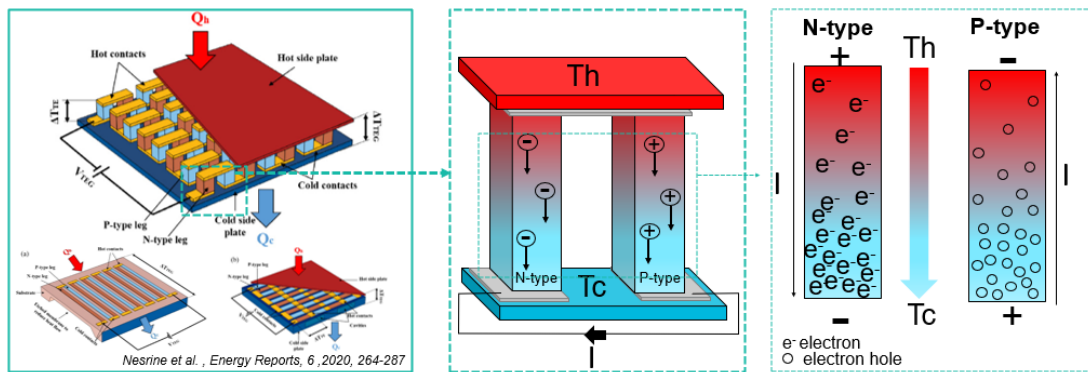


Figuur 6. Overzicht van het Thermoharv-project

De reikwijdte van het project gaat verder dan eenvoudige technologische ontwikkeling. Het doel van het consortium is om "de gehele waardeketen van apparaten te optimaliseren, van de synthese van materialen tot hun terugwinning aan het einde van hun levensduur".²⁰ Deze holistische benadering betekent een directe toewijding aan de principes van een circulaire economie en het SSbD-kader. Door zich te richten op het terugwinnen van energie die anders verloren zou gaan, pakt Thermoharv een belangrijke duurzaamheidsuitdaging aan en draagt direct bij aan het SSbD-principe van het minimaliseren van de milieubelasting vanuit levenscyclusperspectief.¹¹ De expliciete nadruk van het project op een "ecologisch verantwoorde benadering" van materiaalselectie onderstreept de rol ervan als levende toepassing van deze beleidsmaatregelen.¹²

3.2 Materialen en Kenmerken: Een Diepgaande Technische Analyse

De technische basis van Thermoharvs apparaten is gebaseerd op de fysische principes van thermo-elektriciteit en pyro-elektriciteit.¹² Thermo-elektriciteit zet een temperatuurverschil tussen twee oppervlakken om in een elektrische stroom, terwijl pyro-elektriciteit thermische fluctuaties omzet in een elektrische lading (Figuur 4).¹² De belangrijkste materialen van het project zijn flexibele polymeren en thermoplasten, geïntegreerd in gedrukte elektronische apparaten en geleidende prints.¹² Centexbel, een belangrijke partner, heeft expertise in het integreren van deze gedrukte apparaten in diverse materialen, waaronder coatings, textielmaterialen en composieten, vaak met behulp van een transferproces op een TPU-gecoate substraat.¹² Deze lamineertechniek wordt gebruikt om prototypes te maken, zoals sleeves voor warmwaterleidingen, die vervolgens onder echte omstandigheden worden getest.²⁰



Figuur 7. Principe van de Thema-Elektrische Generator (TEG)

De materialen en functionaliteit van het Thermoharv-project tonen een bewuste afstemming op de "duurzame" pijler van het SSbD-raamwerk. Door lichtgewicht en flexibele slimme textiel en composieten te ontwikkelen, vervult het project een waardevolle functie: energierugwinning — terwijl er minder middelen worden gebruikt dan traditionele rigide elektronische systemen.²¹ De ontwikkeling van deze materialen draagt bij aan de algehele vermindering van het energieverbruik in gebouwen, omdat de teruggewonnen thermische energie de totale energievoetafdruk van de constructie vermindert.¹² Deze focus op het verminderen van energie- en hulpbronnenverbruik is in overeenstemming met de SSbD-principes van "Design for Energy Efficiency" en "Material Efficiency."^{Art. 11}

IV. De uitdaging van circulariteit: Analyse van barrières aan het levenseinde

4.1 Het recyclingdilemma van multimateriaalproducten

Hoewel de materialen van Thermoharv zijn ontworpen voor hoge prestaties en functionaliteit, vormt hun multimaterialen karakter aan het einde van hun levensduur een aanzienlijke uitdaging. De slimme en composiettextiel van het project, zoals meerlaagse verpakkingen, zijn gemaakt van verschillende materialen (bijv. polymeren, elektronica, lijmen) die aan elkaar worden gesmelt.³ Deze heterogeniteit maakt scheiding en recycling uiterst moeilijk. Minder dan 10% van de geplastificeerde folies wereldwijd wordt gerecycled, waarbij de meeste op stortplaatsen of verbrandingsovens terechtkomen.⁴

De belangrijkste barrières voor recycling zijn tweeledig. Ten eerste is er een fundamentele chemische incompatibiliteit tussen verschillende materialen. Bijvoorbeeld, gewone kunststoffen zoals polyethyleen (PE) en polypropyleen (PP) hebben verschillende smeltpunten (ongeveer 115 °C en 160 °C respectievelijk), waardoor het moeilijk is om ze samen in dezelfde recyclingstroom te verwerken.⁴ Ten tweede zijn de complexe en strak gebonden structuren van deze materialen bestand tegen conventionele mechanische scheidingsmethoden, zoals float-well classificatie of luchtclassificatie, die vaak onvoldoende zijn voor dunne, gesmolten lagen.^{Dit} creëert een fundamentele paradox: de eigenschappen die deze materialen innovatief en duurzaam maken, maken ze ook onverenigbaar met de bestaande recyclinginfrastructuur. Traditionele textielrecyclingmethoden, die voornamelijk pre- en post-consumentenmaterialen verwerken voor hergebruik of recycling tot doekjes of isolatie, zijn niet uitgerust voor de complexe integratie van elektronica en geleidende polymeren zoals in Thermoharv-

producten.²³ Het succes van het project hangt daarom af van het vermogen om dit fundamentele dilemma van multimateriële complexiteit op te lossen.

4.2 De "Risicocyclus" van legacy-additieven: Een bedreiging voor veiligheid en circulariteit

De tweede grote uitdaging aan het einde van de levensduur is de aanwezigheid van gevaarlijke chemicaliën, of "legacy additieven", in gerecyclede materialen. Deze stoffen, zoals lood, cadmium en enkele specifieke orthoftalaten zoals bis(2-ethylhexyl) ftalaat (DEHP), werden historisch gebruikt in kunststoffen, maar worden nu gereguleerd.²⁴ Een studie van een nieuwe polyvinylchloride (PVC) vloer toonde aan dat 16% van de monsters deze gereguleerde gevaarlijke chemicaliën bevatte met meer dan 0,1% naar gewicht, waarschijnlijk door het gebruik van gerecyclede PVC.²⁵ Dit toont een 'risicocyclus' aan waarin gevaarlijke stoffen uit oude producten via ongecontroleerde recyclingpraktijken opnieuw op de markt worden gebracht, waardoor hun terugtrekking wordt vertraagd en nieuwe materialen worden verontreinigd.^{Art. 24}

Deze bestendinging van gevaarlijke chemicaliën in de circulaire economie biedt een krachtige empirische rechtvaardiging voor de "veilige" pijler van het SSbD-kader. Het toont aan dat het vertrouwen op processen aan het einde van het leven om gevaren te beperken een onvoldoende strategie is; De verantwoordelijkheid moet worden overgedragen aan de ontwerp- en materiaalinkoofases. Voor Thermoharv betekent dit dat, zelfs als een perfecte recyclingtechnologie wordt ontwikkeld, de materiaalinkoopstrategie van het project actief moet filteren en grondstoffen met deze oude additieven moet vermijden. Zonder dergelijke proactieve maatregelen zou het eindproduct, ondanks het gemaakt van gerecycled materiaal, onveilig kunnen blijven en niet aan de SSbD-criteria voldoen, wat zowel de veiligheid als de langetermijnlevensvatbaarheid van het circulaire model in gevaar brengt.

V. Naar een circulaire toekomst: aanbevelingen en beleidspaden

5.1 Herdenken voor een circulaire economie: een "gekoppelde" benadering

Een puur technische oplossing voor recycling is onvoldoende om echte circulariteit te bereiken. Een holistische benadering vereist "systeeminnovatie" waarbij het fysieke ontwerp van het product wordt "gekoppeld" aan een strategisch businessmodel. Voor het Thermoharv-project betekent dit het ontwerpen van slimme kledingstukken of composietmouwen met onderdelen die gemakkelijk uit elkaar te halen zijn, gerepareerd of vervangen kunnen worden.¹⁹ Dit omvat het gebruik van gemakkelijk te scheiden modulaire onderdelen en materialen, een kernprincipe in de roadmap van de composietindustrie voor circulair ontwerp.¹⁹ De effectiviteit van deze ontwerpmethoden kan echter beperkt worden door bestaande bedrijfsmodellen en een gebrek aan markt voor gerecyclede materialen.^{Art. 15}

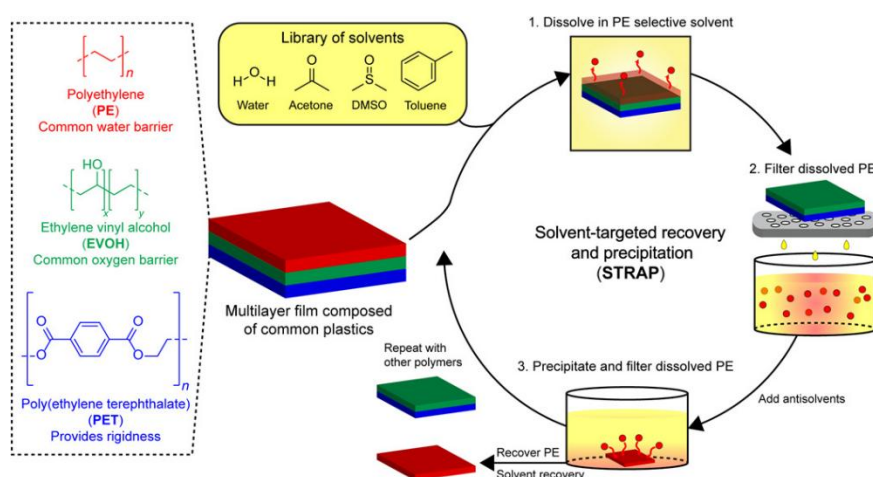
Om dit te overwinnen, zou het Thermoharv-consortium circulaire businessmodellen moeten verkennen en prototypen die controle aan het einde van de levensduur waarborgen. Een overtuigend model is het "product as a service", waarbij het consortium of een geassocieerde partner het eigendom behoudt van de thermische energie-opvangapparatuur.¹³ In plaats van de producten direct te verkopen, konden ze elegante kledingstukken huren of handvatten maken, zodat ze aan het einde van hun levensduur de apparaten terugkeren naar een centrale en gecontroleerde faciliteit voor terugwinning.⁸ Dit model, dat steeds populairder wordt in de textielindustrie, zou producten langer in omloop houden en voorkomen

dat ze in een gefragmenteerde en niet-uitgeruste afvalstroom terechtkomen.⁸ Deze bedrijfsstrategie zou een directe terugkoppeling aan ontwerpers bieden, waardoor continue productverbetering en materiaalinnovatie mogelijk zijn, waardoor de cirkel in de praktijk wordt gesloten, niet alleen in theorie.

5.2 Geavanceerde recyclingtechnologieën: Een Weg naar hoogzuivere waardering

Gezien de inherente complexiteit van Thermoharv's meerlaagse materialen is conventionele mechanische recycling geen haalbare weg naar hoogwaardige circulariteit. De achteruitgang van thermomechanische eigenschappen door herhaald smelten en het onvermogen om de gesmolten lagen te scheiden maken het tot een suboptimale keuze.⁴ Een veelbelovender pad is de toepassing van geavanceerde recyclingtechnologieën, met name oplosmiddelgebaseerde processen.

Oplosmiddelgebaseerde recycling gebruikt oplosmiddelen om doelpolymeren selectief op te lossen (Figuur 5), waarbij ze worden gescheiden van additieven, kleurstoffen en andere verontreinigingen.⁶ Deze methode biedt een schonere, meer gerichte oplossing die hoogwaardige recycles kan produceren met "maagdelijke materiaaleigenschappen."⁶ Het proces is minder energie-intensief dan thermochemische recycling en is bijzonder geschikt voor complexe en besmette kunststoffen en composieten.⁶ Specifieke processen, zoals de oplosmiddelgerichte terugwinnings- en neerslagmethode (STRAP), hebben aangetoond dat ze alle samenstellende polymeerlagen kunnen terugwinnen uit meerlagige films met hoge materiaalefficiëntie.²⁷ Een alternatieve aanpak is een microperforatieproces waarbij chemische middelen toegang krijgen tot en verwijderingen van lijmen, een eenvoudige en milieuvriendelijke procedure waarmee meerlaagse materialen kunnen worden gescheiden zonder dat organische oplosmiddelen nodig zijn.²⁸ Het bestaan van deze technologieën biedt een duidelijke en concrete richting voor het Thermoharv-project. Door een oplosmiddelgebaseerd recyclingprotocol te integreren, kan het project de end-of-life-uitdaging verschuiven van een 'als' naar een 'hoe', zodat waardevolle polymeren en componenten worden teruggewonnen en hergebruikt, waarmee de cirkelcirkel wordt voltooid.



Theodore W. Walker et al., Sci. Adv.6, eaba7599(2020)

Figuur 8 Voorbeeld van het oplossen van een meerlaagse polymeerfilm

5.3 De rol van materialen van de volgende generatie: Het SSbD-ideaal

De diepste aansluiting op het SSbD-kader zou Thermoharv's onderzoek en ontwikkeling zijn van materialen die next-generation polymeren onderzoeken die inherent zijn ontworpen voor circulariteit en veiligheid. Een van deze materialenklassen zijn niet-isocyanate polyurethaan (NIPU's).

Conventionele polyurethaan (PU's), die waarschijnlijk in de flexibele composieten van Thermoharv zullen worden gebruikt, worden doorgaans gemaakt van isocyanaten, die zeer reactief zijn en veiligheidsrisico's vormen.²⁹ NIPU's daarentegen worden gesynthetiseerd via "isocyanatvrije" routes, vaak uit bio-gebaseerde voorgangers.³⁰

De unieke chemische structuur van NIPU's, die functionele groepen omvat die geschikt zijn voor dynamische hechtingsuitwisseling, maakt het gemakkelijker om ze te herverwerken en te recyclen.³⁰ Het verkennen van NIPU's of vergelijkbare, volgende generatie bio-gebaseerde polymeren zou een krachtige belichaming zijn van het SSbD-kader in actie. Door een veiligheidsprobleem bij de bron fundamenteel op te lossen—het verwijderen van een gevaarlijke chemische stof uit het syntheseproces—voldoet deze materiaalkeuze tegelijkertijd aan zowel de "veilige" als de "duurzame" pijlers van het SSbD-kader.³⁰ Dit is een ultieme voorbeeld van een ontwerpbenadering voor circulariteit, waarbij het materiaal zelf is ontworpen om een echt lussysteem mogelijk te maken, dat de ideale toekomst vertegenwoordigt voor projecten op het snijpunt van technologie en duurzaamheid.

Uiterlijk	Beschrijving van de uitlijning met SSbD
Vrijwillig kader	De expliciete "eco-verantwoordelijke" benadering van het project en de focus op herstel aan het levenseinde tonen een proactieve inzet voor de vrijwillige principes van de SSbD, waardoor het wordt gepositioneerd als een pilotproject voor de praktische toepassing van het kader.
Definitie van "veilig"	Het materiaalkeuzeprocess van het consortium moet prioriteit geven aan het vermijden van inherent gevaarlijke eigenschappen en actief oude additieven filteren om de veiligheid van het eindproduct te waarborgen en te voorkomen dat deze via recycling opnieuw in de toeleveringsketen worden opgenomen.
Definitie van "duurzaam"	Het Thermoharv-project pakt dit criterium direct aan door een waardevolle functie — energierugwinning — te vervullen zonder milieugrenzen te overschrijden, afvalwarmte te gebruiken om elektriciteit op te wekken en de totale energievoetafdruk van gebouwen te verminderen.
Leidend principe: Materiaalefficiëntie	Door lichtgewicht en flexibele materialen voor energierugwinning te ontwikkelen, maximaliseert het project de functionele output per

	materiaaleenheid, waardoor het resourceverbruik wordt verminderd ten opzichte van traditionele rigide elektronische systemen.
Leidend principe: Ontwerp voor het Einde van het Leven	Het succes van het project is gebaseerd op het vermogen om multimaterialenproducten te ontwerpen die eenvoudig uit elkaar gehaald, gescheiden en aan het einde van hun levensduur kunnen worden teruggevonden. Dit vereist een verschuiving van conventionele ontwerpmethoden naar een focus op modulariteit en materiaalcompatibiliteit met geavanceerde recyclingprocessen.
Iteratief proces	Als onderzoeksproject heeft Thermoharv de mogelijkheid om de iteratieve en progressieve evaluatiebenadering van het SSbD-kader toe te passen. Dit maakt voortdurende herwaardering en optimalisatie van productveiligheid en duurzaamheid mogelijk naarmate innovatie rijpt en nieuwe data beschikbaar komt.

Recyclingprotocol	Beschrijving van het proces	Voordelen	Nadelen en toepasbaarheid op Thermoharv
Mechanische recycling	Plastics malen en smelten om ze te hergebruiken in nieuwe producten, vaak met een andere toepassing (downcycling). ^{Art. 26}	Eenvoudig, relatief goedkoop en breed verkrijgbaar. ³	Ineffectief voor multi-materiaalstructuren vanwege chemische incompatibiliteit en moeilijkheid bij scheiding. ⁴ Thermomechanische eigenschappen verslechteren bij elke cyclus. ²⁶ Niet geschikt voor Thermoharv-complexe materialen.
Chemische recycling	De depolymerisatie van plastic afval tot monomeren	Maakt hoogwaardige grondstoffen voor nieuwe producten. ⁶ Kan	Hoge energie-intensiteit vereist vaak zware omstandigheden. ²⁶

	of waardevolle kleine moleculen met behulp van hoge temperatuur of katalysatoren. ⁶	enkele gemengde afvalstromen verwerken.	De meest voorkomende methoden (bijv. glycolyse) winnen slechts één component (polyolen), niet alle oorspronkelijke uitgangsmaterialen. Art. 26
Oplosmiddelgebaseerde recycling	Gebruikt oplosmiddelen om een doelpolymeer selectief op te lossen uit een gemengd materiaal, waarbij verontreinigingen en andere materialen achterblijven. Polymeren met hoge zuiverheid worden teruggewonnen door precipitatie. ⁶	Produceert hoogzuivere recycles met "maagdelijke" materiaaleigenschappen. ⁷ Verwijdert effectief gevaarlijke verontreinigingen en toevoegingen. Minder energie-intensief dan chemische recycling. ⁶	Dit vereist gespecialiseerde oplosmiddelen en infrastructuur. De keuze van oplosmiddel hangt af van het type kunststoflaminaat. ²⁷ Residuen van adhesiepromotors kunnen op aparte lagen achterblijven. ²⁷ meest veelbelovende routes naar Thermoharv.

VI. Conclusie: Een blauwdruk voor duurzame innovatie

Het Thermoharv-project is meer dan een technisch initiatief; het is een cruciale testcase voor de praktische toepassing van het Safe & Sustainable by Design (SSbD)-kader en de principes van de circulaire economie van de Europese Unie. De missie van het project om multimaterialen- en flexibele energierugwinningsapparaten te creëren voor slimme gebouwen en kleding sluit direct aan bij de strategische visie van de EU voor een groene en circulaire industriële transitie. Deze analyse toont aan dat door afvalthermische energie om te zetten in bruikbare energie, het project de kernprincipes van SSbD belichaamt van het minimaliseren van milieubelasting en het bieden van functies binnen planetaire grenzen.^{Art. 11}

De analyse onthult echter ook een belangrijke systemische uitdaging: de inherente paradox van multimaterialenproducten, waarbij functionele innovatie onbedoeld kan leiden tot uitvallen aan het einde van de levensduur.⁴ Dit overwinnen vereist een strategische, veelzijdige aanpak. Het consortium moet verder gaan dan een eenvoudige focus op technische prestaties en een holistische overweging van de gehele productlevenscyclus, geleid door het SSbD-raamwerk. Dit omvat het ontwerpen van producten die gemakkelijk te repareren en te demonteren zijn, een ontwerpfilosofie die "gekoppeld" moet worden aan een businessmodel dat controle aan het einde van de levensduur waarborgt, zoals een product-as-a-service raamwerk.⁸

Daarnaast hangt het succes van het project af van het vermogen om geavanceerde recyclingtechnologieën te benutten. Bewijs suggereert dat oplosmiddelgebaseerde recycling, met zijn vermogen om hoogzuivere materialen te scheiden en verontreinigingen te verwijderen, de meest haalbare weg is naar een hoge waarde circulariteit voor de complexe materialen van Thermoharv.⁶ Een toewijding aan deze technologie, gecombineerd met een proactieve materiaalinkoopstrategie die legacy additieven vermijdt, zou ervoor zorgen dat de eindproducten zowel veilig als echt duurzaam zijn.²⁵

Uiteindelijk heeft het Thermoharv-project het potentieel om een definitief model te worden voor een nieuw tijdperk van duurzame innovatie. Door aan te tonen dat technische excellentie naadloos kan worden geïntegreerd met veiligheid, circulariteit en robuuste bedrijfsmodellen, kan het een concreet model bieden om de uitdagingen van een lineaire economie te overwinnen en een toekomst te bouwen die niet alleen functioneel en concurrerend is, maar ook inherent veiliger en duurzamer voor mensen en de planeet.

Dankbetuigingen

Het Thermoharv-project werd mogelijk gemaakt dankzij de steun van Interreg France, Wallonia Vlaanderen en de medefinanciering van de provincie West-Vlaanderen. Thermoharv is een project dat wordt gecoördineerd door de Universiteit van Mons.



Bronvermeldingen

1. Veilig en duurzaam frame bij ontwerp, geraadpleegd op 24 september 2025
https://seadragon-finch-w869.squarespace.com/s/SSbD_FinalDraft_May2024_AEN_JT.pdf
https://seadragon-finch-w869.squarespace.com/s/SSbD_FinalDraft_May2024_AEN_JT.pdf
2. Veilig en duurzaam door ontwerp - Europese Commissie - Onderzoek en Innovatie, geraadpleegd op 24 september 2025 https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/chemicals-and-advanced-materials/safe-and-sustainable-design_en https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/chemicals-and-advanced-materials/safe-and-sustainable-design_en

3. Verpakkingsrecycling: Uitdagingen en Oplossingen, geraadpleegd op 24 september 2025 <https://www.recyclingtoday.org/blogs/news/multi-layer-packaging-recycling-challenges-and-solutions>
4. Barriers voor het recycelen van gelamineerde folie: Uitdagingen en kansen in technische oplossingen Executive Summary - AWS, geraadpleegd op 24 september 2025 https://sdiopr.s3.ap-south-1.amazonaws.com/2024/Oct/21-Oct-24/2024_JERR_123581/Ms_JERR_123581.pdf
5. De eco-ontwerptransformatie van slimme kleding: naar een systemisch en gekoppeld perspectief van sociaal-ecologisch-technologische systemen - MDPI, geraadpleegd op 24 september 2025 <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/5/2102>
6. Oplosmiddelgebaseerde recycling: Duurzaam Ontbindend Plastic - Vertec BioSolvents, geraadpleegd op 24 september 2025 <https://www.vertecbiosolvents.com/solvent-based-recycling-breaking-down-plastics-sustainably>
7. Recycling van oplosmiddelhoudende kunststoffen - Fraunhofer IVV, geraadpleegd op 24 september 2025 <https://www.ivv.fraunhofer.de/en/recycling-environment/recycling-plastics-solvent-based.html> <https://www.ivv.fraunhofer.de/en/recycling-environment/recycling-plastics-solvent-based.html>
8. Circulaire bedrijfsmodellen voor mode en textiel | WRAP - De Agenda voor Afval en Hulpbronnen, geraadpleegd op 24 september 2025 <https://www.wrap.ngo/taking-action/textiles/actions/circular-business-models-fashion-textiles> <https://www.wrap.ngo/taking-action/textiles/actions/circular-business-models-fashion-textiles>
9. Circulaire Gids voor Modebedrijfsmodellen | WRAP - De Actieagenda over Afval en Hulpbronnen, geraadpleegd op 24 september 2025 <https://www.wrap.ngo/resources/guide/circular-business-models-guide-fashion> <https://www.wrap.ngo/resources/guide/circular-business-models-guide-fashion>
10. Le parcours Safe and Sustainable by Design (SSbD) - PRé Sustainability, consulté le 24 septembre 2025 <https://pre-sustainability.com/articles/from-damage-control-to-sustainable-innovation-the-safe-and-sustainable-by-design-ssbd-journey/>
11. Achtergrond over Safe-and-sustainable-by-design (SSbD) | EDC-MixRisk, geraadpleegd op 24 september 2025 <https://edcmixrisk.ki.se/wp-content/uploads/sites/122/2022/11/Background-on-SSbD.pdf> <https://edcmixrisk.ki.se/wp-content/uploads/sites/122/2022/11/Background-on-SSbD.pdf>
12. Thermoharv | Centexbel, geraadpleegd op 24 september 2025 <https://www.centexbel.be/en/innovation/research/thermoharv> <https://www.centexbel.be/en/innovation/research/thermoharv>
13. Ontwerpen voor de Circulaire Economie: Adopter la réutilisation et le recyclage - Pro-Dev, consulté le 24 septembre 2025 <https://pro-dev.co.nz/blog/designing-for-the-circular-economy/>

14. De circulaire economie | Definitie & Model Uitgelegd | Ellen MacArthur Foundation, geraadpleegd op 24 september 2025
<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>
15. Circulaire composieten door ontwerp: Een ontwerpmethode testen in de industrie - ResearchGate, geraadpleegd op 24 september 2025
https://www.researchgate.net/publication/361697246_Circular_Composites_by_Design_Testing_a_Design_Method_in_Industry
16. 5 Over het hoofd geziene voordelen van textielrecycling - Looptworks, geraadpleegd op 24 september 2025 <https://looptworks.com/5-overlooked-benefits-of-textile-recycling/>
17. EU-strategie voor duurzame en circulaire textiel - milieu - Europese Commissie, geraadpleegd op 24 september 2025 https://environment.ec.europa.eu/strategy/textiles-strategy_en
https://environment.ec.europa.eu/strategy/textiles-strategy_en
18. EU-strategie voor duurzame en circulaire textiel - TrusTrace, geraadpleegd op 24 september 2025 <https://trustrace.com/knowledge-hub/eu-strategy-sustainable-and-circular-textiles>
19. Composities | Alpine Space Program, geraadpleegd op 24 september 2025
https://www.alpine-space.eu/wp-content/uploads/2024/11/Roadmap_Composites_Working_v2.3.pdf
20. THERMOHARV - IMT Nord Europe Research Centres, geraadpleegd op 24 september 2025
<https://research.imt-nord-europe.fr/projects/thermoharv/> <https://research.imt-nord-europe.fr/projects/thermoharv/>
21. (PDF) SLIMME STOFFEN - DRAAGBARE TECHNOLOGIE - ResearchGate, geraadpleegd op 24 september 2025 https://www.researchgate.net/publication/341146408_SMART_FABRICS-WEARABLE_TECHNOLOGY
https://www.researchgate.net/publication/341146408_SMART_FABRICS-WEARABLE_TECHNOLOGY
22. Slimme textiel: Een gereedschapskist om de toekomst vorm te geven - ResearchGate, geraadpleegd op 24 september 2025
https://www.researchgate.net/publication/350600803_Smart_textiles_A_toolkit_to_fashion_the_future
23. Geschiedenis/Visie - SMARTASN - Secundaire Materialen en Gerecycled Textiel, geraadpleegd op 24 september 2025 <https://www.smartasn.org/about-smart/history-vision/>
24. Duurzaamheid & Circulariteit NU - Thieme Connect, geraadpleegd op 24 september 2025
<https://www.thieme-connect.com/products/ejournals/pdf/10.1055/a-2573-8285.pdf>
<https://www.thieme-connect.com/products/ejournals/pdf/10.1055/a-2573-8285.pdf>
25. Legacy en opkomende weekmakers en stabilisatoren in PVC-vloeren..., geraadpleegd op 24 september 2025 <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.3c04851>
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.3c04851>

26. Richting circulaire recycling van polyurethaan: depolymerisatie en terugwinning van isocyanaten - PMC, geraadpleegd op 24 september 2025
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11040557/>
27. Naar een beter begrip van de delaminatie van multilagen ..., geraadpleegd op 24 september 2025 <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8518906/>
28. Meerlaags delaminatieproces - Innoget, geraadpleegd op 24 september 2025
<https://www.innoget.com/technology-offers/9878/multilayer-film-delamination-process>
29. Polyurethaanrecycling: Waar we zijn en waar we naartoe gaan - RSC Publishing, geraadpleegd op 24 september 2025 <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2024/gc/d3gc02091f>
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2024/gc/d3gc02091f>
30. Geavanceerde ontwikkeling van niet-isocyanat polyurethaanschuimen (NIPU): Van duurzame voorlopers tot milieueffectrapportage - RSC Publishing, geraadpleegd op 24 september 2025
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2025/gc/d4gc05796a>
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2025/gc/d4gc05796a>
31. Duurzaamheid van niet-isocyanate polyurethaan (NIPU) - MDPI, geraadpleegd op 24 september 2025 <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/22/9911>